

文章编号:0254-0096(2018)09-2607-10

多重化双向DC/DC变换器电流增广控制研究

马速良, 武建文, 黄 炼, 陈明轩

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对光储分布式发电系统中多重化双向DC/DC变换器结构,提出一种基于输入-输出线性化的增广电流控制方法。首先建立双向DC/DC变换器仿射非线性模型并分析其内动态方程,确定以电感电流为输出的状态空间描述;然后利用非线性变换将输入-输出线性化并引入增广电流反馈机制,根据二阶经典控制系统,设计控制器参数。最后经数字仿真验证该文提出的控制方法可准确、快速、强鲁棒性地跟踪功率指令,消除稳态误差对电网和负荷的不良影响,多重化结构与错相调制有效减小电感电流以及储能充放电电流纹波。

关键词: 分布式发电系统; 储能系统; 双向DC/DC变换器; 多重化技术; 非线性控制; 增广输出反馈

中图分类号: TM614; TM615 **文献标识码:** A

0 引 言

分布式发电能够充分利用清洁和可再生能源,与集中式发电互相补充,是解决能源与环境问题的有效手段^[1-3]。合理有效利用分布式发电中储能系统平衡分布式新能源发电、大电网以及用户负荷三者之间的功率需求,提高分布式能源的渗透率,并保证电网安全和稳定运行,可实现用户与电网之间的能源交互。储能系统中的电力电子变换器的设计及控制成为分布式发电系统发展的重点技术环节^[4-6]。

国内外专家学者对储能系统中电力电子变换器建模与控制进行过大量研究。文献[7、8]根据双向DC/DC变流器的2种工作模式的模型,设计闭环控制器,该控制器能实现并解决电能供需不平衡的问题;文献[9]建立三通道交错并联磁集成的双向DC/DC变换器的交流小信号模型,并设计电压电流双闭环的多项式控制器,可实现输出电压的快速跟踪;文献[10、11]提出一种新型交错并联双向DC/DC变换器,说明交错并联技术能减小电感电流纹波并可同时减小开关管电流应力;文献[12~14]利用多重化双向DC/DC变流器的状态空间平均小信号模型设计双闭环控制器,说明采用双闭环控制策

略的多重化双向DC/DC变流器具有很好的动态和稳态性能,并可减小电流纹波与谐波;文献[15]分析三电平双向直流变换器工作原理,其设计控制策略可有效提高超级电容器充放电效率和能量高效地双向流通;文献[16]研究一种适用于高电压下超级电容储能系统的多模块多电平的双向DC/DC变换器,提出基于储能能量状态的控制方法,实现超级电容器组间均压控制;文献[17]建立Boost电路的欧拉-拉格朗日模型,基于无源控制设计简单、鲁棒性高的控制器,验证无源控制器可行性;文献[18~22]均是基于一类仿射非线性模型,通过状态反馈精确线性化理论推导,构建虚拟输出将非线性系统变为线性空间描述的白箱分析,并设计控制器完成控制目标;文献[23、24]讨论在仿射非线性系统不满足状态反馈精确线性化条件下,虚拟直观物理含义的输出方程,设计线性表征的输入-输出的黑箱系统,设计基于经典控制理论体系的控制器,以满足系统期望性能的要求;文献[25]基于混杂系统理论,分析非隔离DC/DC功率变换器的动态特性,采用 v 步离散法建立分段仿射模型,结合预测控制和二次型性能指标设计实验样机,验证该模型预测控制其的有效性。

据上述学者的工作可知,文献[7~16]均旨在分

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51377007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20131102130006)

通信作者: 马速良(1988—),男,博士研究生,主要从事电力电子变换器建模及非线性控制、储能技术及控制方面的研究。

msl13811880673@126.com

析多重化双向 DC/DC 电路的应用优势,但控制过程均是基于小信号建模基础之上,未考虑到工作状态变迁电力电子拓扑非线性特点;而文献[17~25]主要利用非线性控制设计,解决电力电子的非线性问题,但未考虑稳态误差的影响,尤其在双向 DC/DC 电路应用于光伏-储能微电网的情况,稳态误差对储能、电网与负载的影响较大,需重点考虑。本文提出一种基于多重化非隔离双向 DC/DC 变换器仿射非线性模型的输入-输出线性化电流增广控制方法,控制器设计过程解决双向 DC/DC 变换器的非线性问题,并考虑稳态误差影响,提出电流增广方式,以达到储能无误差平衡源-电网-负荷功率需求的目的。本文首先分析双向 DC/DC 变换器的电路拓扑,建立在电流连续模式 (continuous conduction model, CCM) 下的仿射非线性模型,并分析系统内动态方程确定以电感电流为输出的状态空间描述;然后依据非线性控制理论构建非线性变换矩阵,进行输入-输出线性化。利用电流增广输出反馈,得到的二阶经典控制系统模型,计算状态反馈系数,设计控制器;最后经数字仿真验证本文提出的控制方法可准确、快速、强鲁棒性、无静差严格地实现功率指令跟踪功能。多重化拓扑结构、无静差控制方式以及错相调制技术使储能充放电电流纹波、谐波降低,减小储能过动作,达到合理利用储能、延长储能使用寿命的目的。

1 分布式光伏-储能系统模型

1.1 分布式光伏-储能系统

分布式光伏-储能系统一般由光伏发电组件及直流变换器、储能单元、双向直流变换器、逆变器以及负荷组成,如图 1 所示。由于光伏的随机性、波动

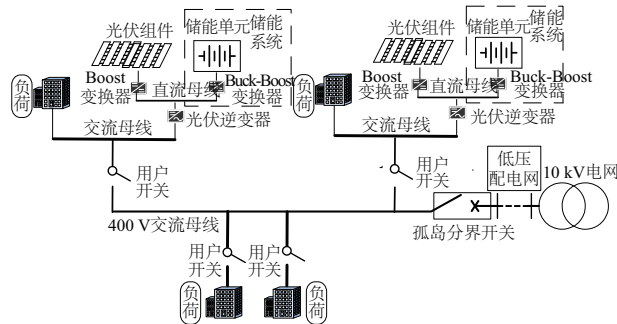


图1 系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram

性,考虑电网及负载的安全稳定运行,加入储能环节以提高其可靠性以及经济性。在并网状态下,储能系统辅助光伏发电经济性运行;在离网状态下,储能系统辅助光伏发电可靠性运行。即储能系统用于平衡光伏、负荷以及电网的供需,工作于能量双向流通的状态切换。而双向 DC/DC 变换器是实现上述工况运行的基本组成部分。

1.2 多重化双向 DC/DC 变换器

一般为减小变换器电感电流纹波、电流谐波含量和滤波器体积,适应 DC/DC 变换器滤波网络参数的优化,把几个结构相同的基本变换器适当并联,开关管触发相位错开一定角度构成另一种复合型 DC/DC 变换器,称之为多重化 DC/DC 变换器。

以两重化为例,如图 2 所示即其电路拓扑结构是在储能电池和直流母线之间接入 2 个相同结构的基本变换电路 (Buck 或 Boost 电路),本文约定变换器采用 PWM 调制方式,两路的开关管 Q_1 和 Q_3 导通时间互错 $T_s/2$, $Q_1(Q_4)$ 与 $Q_2(Q_3)$ 互补导通。其中 T_s 为开关周期, $Q_1 \sim Q_4$ 是 IGBT, L_f 是滤波电感, C 滤波电容。 Q_1 、 Q_3 工作时作两重化 Buck 电路运行, Q_2 、 Q_4 工作时作两重化 Boost。 U_b 表示储能电池两端电压, U_{dc} 表示直流母线电压等于电容电压 U_c , 直流母线输出电流为 I_o , 本文规定分布式光伏、电网以及负载对储能输出的功率指令 $P^* = U_{dc} \times I_o$, 并假设功率指令 P^* 为正时, 储能系统放电; P^* 为负时, 储能系统充电。虚线方框内用一个直流电压源和一个串联电阻来模拟高压侧电源, 其包括光伏电池直流母线接入和逆变器直流母线输出 2 部分, E 是模拟高压侧电源电压, r 是模拟高压侧等效电阻, R 表示直流母线上的负载。

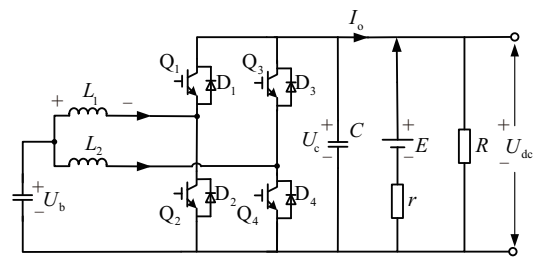


图2 两重化双向 DC-DC 变流器拓扑

Fig. 2 Topology of double-channel interleaving bidirectional DC-DC converter

2 双向DC/DC变换器单输入单输出仿射非线性系统模型

2.1 双向DC/DC仿射非线性系统建模

对于脉宽调制型的DC/DC变换器,目前最普遍的建模方法是状态空间平均法。文献[26]中证明开关变换器传统的状态空间平均模型是欧拉-拉格朗日(Euler-Lagrange, EL)动态系统。根据双向DC/DC电路拓扑以及状态空间平均法建模公式,可建立非隔离双向DC/DC变换器非线性状态空间方程如下所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_b - d \times U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \left[\frac{E}{r} - \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) \times U_{dc} \right] + d \times i_L \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_L ——电感电流的开关周期平均值; d ——开关 $Q_1(Q_2)$ 的占空比, $(1-d)$ 则为开关 $Q_3(Q_4)$ 的占空比。

若直接选取 $[i_L, U_{dc}]$ 作为状态变量,可根据式(1)整理出适用于微分几何方法的非隔离双向DC/DC变换器的单输入单输出仿射非线性系统。但是,在分布式发电系统中双向DC/DC的作用在于跟踪给定功率指令的参变量没有体现,需另引入PI控制等结构进行跟踪控制,而控制效果有限。根据1.2节中的拓扑分析,对系统期望功率 P^* 的跟踪可以转化为跟踪输出电压 U_{dc} : 令 $m = \frac{1}{r} + \frac{1}{R}$, 则 $U_{dc} = U^* = \frac{E}{2rm} + \sqrt{\frac{P^*}{m} + \left(\frac{E}{2rm}\right)^2}$ 并根据瞬时功率平衡关系,可以计算得到电感电流跟踪指令: $I^* = \frac{m(U^*)^2 - EU^*/r}{U_b}$, 其中 U^* 和 I^* 分别代表系统期望功率下所对应的期望直流母线电压和期望电感电流, m 表示假设变量 $m = \frac{1}{r} + \frac{1}{R}$, 由模拟高压侧等效电阻 r , 和直流母线上的负载 R 计算得到。

故规定新状态变量 e 构建状态空间描述如式(2), 其中, $e = [e_1, e_2] = [i_L - I^*, U_{dc} - U^*]$ 。

$$\dot{e} = f(e) + g(e)d \quad (2)$$

其中状态空间维度 $n=2$, 则:

$$f(e) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} U_b \\ \frac{E}{Cr} - \frac{1}{C} m(e_2 + U^*) \end{bmatrix}, \quad g(e) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}(e_2 + U^*) \\ \frac{1}{C}(e_1 + I^*) \end{bmatrix}$$

2.2 基于输入-输出线性化的非线性系统内动态稳定性分析

由式(2)可得到单输入单输出仿射非线性系统的状态方程,而根据非线性控制理论^[27-29],在状态空间描述中不同的输出方程影响系统是否可状态反馈精确线性化,进而影响反馈控制律及系统响应特性。

定义1: 对于一个 n 维系统 Σ , 状态空间描述形如式(3)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3)$$

如果 $\forall x \in W$, W 表示状态变量构成的状态空间, 当满足:

$$\begin{cases} L_g L_f^i h(x) = 0 \\ L_g L_f^{\rho-1} h(x) \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

则系统 Σ 于 W 上具有相对阶 ρ , 其中 $0 \leq i < \rho - 1$, 而 $L_f^i h(x)$ 表示函数 $h(x)$ 在向量场 $f(x)$ 的 i 次导数, 当 $i=0$ 时, $L_g L_f^0 h(x) = L_g h(x)$ 。

对于一个相对阶为 ρ 的系统, 对于系统输出 y 求 r 次导数可得:

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{\rho-1} h(x)u \quad (5)$$

令式(5)的等式右侧等于新输入 v , 则对于新输入下的系统达到了输入-输出线性化的目的, 即输入与输出之间产生一个线性微分关系, 如式(6)所示。并得到新输入与原输入之间关系, 如式(7)所示:

$$y^{(\rho)} = v \quad (6)$$

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{\rho-1} h(x)} (-L_f^{\rho} h(x) + v) \quad (7)$$

式中, u ——式(3)中的输入变量, 即原系统的输入变量。

若上述输入-输出线性化变换过程中能保证系统内动态是稳定的, 则可通过以上步骤完成仿射非线性系统的输入-输出线性化变换, 进而完成控制器设计。

定义2: 对于如式(3)所描述的状态空间描述中, 存在向量函数 $\Theta(x)$ 使得:

$$L_g \Theta(x) = 0, \forall x \in W \quad (8)$$

则非线性系统, 式(3)的内动态方程为:

$$\dot{\Theta}(x) = \Psi(h(x), \Theta(x)), \forall x \in W \quad (9)$$

对于本文的双向 DC/DC 变换器仿射非线性系统,其为单输入单输出系统,则输入向量 v 为一维构成标量 v ,而输出方程矩阵 $h(e)$ 变为标量方程 $H(e)$,如式(12)所示。求解偏微分方程(8)中的向量解 $\Theta(x)$ 变为标量解 $F(e)$,可得方程标量解 $F(e) = L(e_1 + I^*)^2 + C(e_2 + U^*)^2$ 。

1)若直接选择电容电压作为输出,则 $H(e) = e_2$,根据式(2)、式(9)以及 $i_L = e_1 + I^* > 0$,可得式(10):

$$\dot{F}(e) = 2U_b \sqrt{\frac{F(e) - C(H(e) + U^*)}{L}} + \frac{2E}{r}(H(e) + U^*) - 2m(F(e) + U^*)^2 \quad (10)$$

可看出式(10)所描述的系统内动态式不稳定,如此状态空间描述的非线性系统为非最小相位系统,故控制输出电压并不可行。

2)若直接选择电感电流作为输出,则 $H(e) = e_1$ 时,同理仿照上式可得式(11):

$$\dot{F}(e) = -2m \left(\sqrt{\frac{F(e) - L(H(e) + I^*)}{C}} - \frac{E}{2rm} \right)^2 + 2U_b(H(e) + I^*) + \left(\frac{E}{2rm} \right)^2 \quad (11)$$

可以看出式(11)所描述的系统内动态式稳定,如此定义状态空间的输出方程,使得状态空间描述的非线性系统为最小相位系统,可以控制输出电流实现功率跟踪的目的。故双向 DC/DC 变换器仿射非线性状态空间描述为:

$$\begin{cases} \dot{e} = f(e) + g(e)d \\ y = H(e) = e_1 \end{cases} \quad (12)$$

3 基于输入-输出线性化的非线性系统控制器设计

3.1 输入-输出线性化的非线性系统控制器设计

利用公式(12)的双向 DC/DC 变换器仿射非线性状态空间描述,可计算系统相对阶 r 。

$$\begin{cases} L_g H(e) = -\frac{1}{L}(e_2 + U^*) \\ L_f H(e) = \frac{1}{L}U_b \end{cases} \quad (13)$$

根据相对阶定义及式(13)可以看出在电感平均电流不为零时,则 $L_g H(e) \neq 0$, $r = 1$ 。那么可根据式(6)、式(7)设计新控制输入,并利用式(14)实现输入输出线性化,如式(15)所示。

$$d = \frac{-L_f H(e) + v}{L_g H(e)} \quad (14)$$

$$\dot{y} = v \quad (15)$$

3.2 增广空间状态反馈非线性系统控制器设计

根据式(15)的线性输入输出描述可选用一般的输出反馈 $v = -Ky$,其中 K 是控制器参数。若如此设计控制器在不同参数 K 的情况下,控制效果可以保证较高的稳态精度,但是无法消除稳态误差,即系统终值与给定值存在误差。为实现无静差跟踪,可以增广输出反馈,将输出积分项也作为反馈值用于设计控制器,如式(16)所示,得到闭环系统,式(17)以及最终控制律,即式(18):

$$v = -(k_1 y + k_2 \int y dt) \quad (16)$$

$$\dot{y} + k_1 y + k_2 \int y dt = 0 \quad (17)$$

$$d = \frac{-\frac{1}{L}U_b - \left[(k_1(i_L - i^*) + k_2 \int (i_L - i^*) dt) \right]}{-\frac{1}{L}U_{dc}} \quad (18)$$

针对多重化双向 DC/DC 变换器,可利用以上控制器设计方法,设计每重回路控制器,如图 3 所示,表示两重化 DC/DC 变换器的控制及调制框图。

3.3 控制器参数设计与分析

由之前的分析可以得到以下结论,功率指令跟踪可以转换为电感电流直流跟踪,同时仿射非线性系统通过特定的映射可转变为线性输入-输出系统。并由式(17)可看出, $\int y dt$ 的动、稳态响应性能与控制参数 k_1 、 k_2 有关。将式(17)看做二阶系统,则控制参数 k_1 、 k_2 必然与二阶系统参数自然频率 ω_n , 阻尼比 ξ 有关,令 $\xi = k_1 / (2\sqrt{k_2})$, $\omega_n^2 = k_2$ 。并解式(17)得到 $\int y dt$ 及 y 的时域解为:

$$\begin{cases} \int y dt = C_2 e^{-\omega_n(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})} + C_3 e^{-\omega_n(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})} \\ y = C_2 \omega_n (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}) e^{-\omega_n(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})} + C_3 \omega_n (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) e^{-\omega_n(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})} \end{cases} \quad (19)$$

式中, C_2 、 C_3 ——任意实数。

从式(19)可看出,系统输出 y 的响应幅值与振荡情况,由 ω_n 和 ξ 共同决定,而系统的超调由其阻尼比决定。

由电路理论可知,系统的震荡频率 $\omega_o = 1/\sqrt{LC}$,系统能量主要通过电感 L 和电容 C 储

存与传递。故令 $\omega_n^2 = k\omega_o^2$, 可通过选定合适系数 k 以及阻尼比 ξ 得到系统控制参数, 如式(20)所示:

$$\begin{cases} k_1 = 2\xi\sqrt{k_2} \\ k_2 = k/(LC) \end{cases} \quad (20)$$

值得注意的是, 在选择系数 k 以及 ξ 时, 应同时考虑控制信号 d 的物理含义为占空比, 在稳态时需保证其在 $(0, 1)$ 的范围以内。

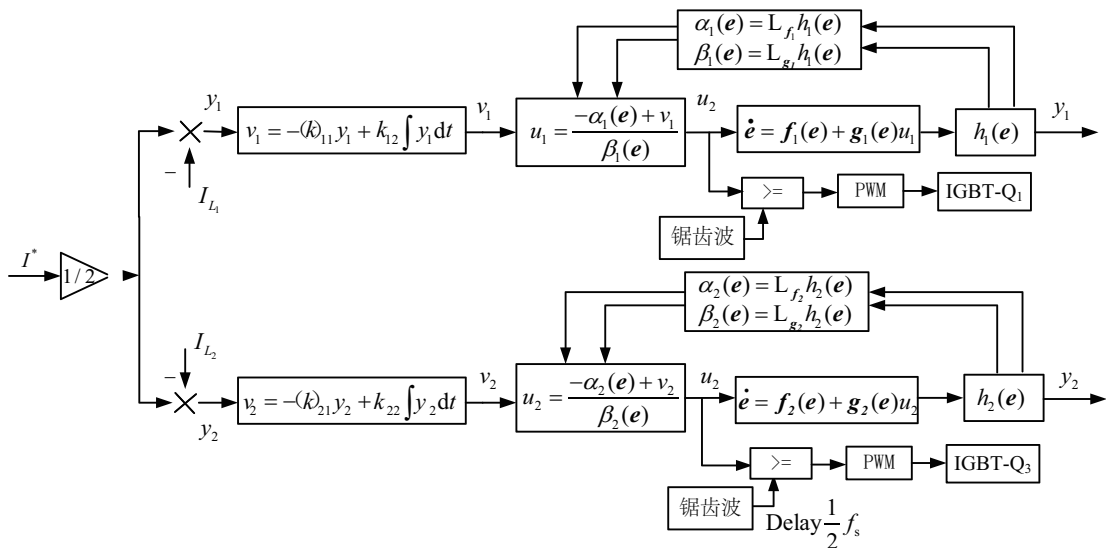


图3 控制结构图
Fig. 3 Structure graph of control

4 数字仿真实验

为验证上述控制算法在多重化双向DC/DC变换器中跟踪储能功率指令跟踪的有效性, 本文基于Matlab/Simulink 仿真平台, 针对两重化结构, 首先验证控制参数 k 与 ξ 对控制效果的影响, 符合3.3节中的分析结果。然后, 假设在控制参数 $k=2, \xi=5$ 情况下, 对比增广输出反馈控制与非增广的控制效果, 说明增广输出反馈控制的优越性, 最后模拟高压侧电压波动、负载变化以及系统参数的变化3种工况仿真, 以说明该方法有较强的鲁棒性。最后, 对比相同指令跟踪及控制算法下, 多重化拓扑的优点, 系统参数如表1所示。

表1 仿真参数

| Table 1 Parameters in simulation | | | |
|----------------------------------|-----|-------------------|-----|
| 仿真参数 | 数值 | 仿真参数 | 数值 |
| 高压侧电源电压/V | 650 | 电感 L_2 /mH | 2 |
| 电池额定电压/V | 216 | 电容/ μ F | 200 |
| 电池额定功率/kW | 5 | 高压侧等效电阻/ Ω | 5 |
| 电池容量/Ah | 1.5 | 负载电阻/ Ω | 40 |
| 电感 L_1 /mH | 2 | 开关频率/kHz | 20 |

4.1 控制参数验证

假设在0.1 s输出功率指令为 $P^*=+5$ kW, 则电感电流指令 $I^*/2=10.9$ A。为验证3.3节分析控制器参数阻尼比 ξ 的影响, 令 $k=2$, 分析电感电流响应曲线, 如图4所示。

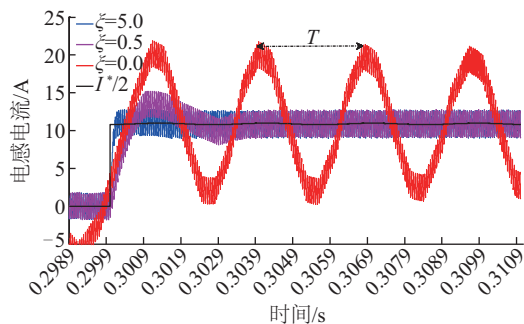


图4 不同阻尼比的对比图

Fig. 4 Comparison diagram in different damping ratios

从图4可看出: 当 k 一定时, 随着 ξ 减小, 系统出现超调以及振荡, 且当 $\xi=0$ 时, 系统出现等幅振荡, 即无阻尼系统特性。仿真中振荡周期 $T=2.8$ ms, 而 $T_n=2\pi/\omega_n \approx 2.8$ ms = T 。实验结果与3.3节控制参数的分析结论一致, 可结合控制参数影响的结论与实际需求合理选择控制参数 k 以及 ξ 。

4.2 增广输出反馈控制参数效果验证

假设电池剩余能量状态 $SOE=50\%$, 功率指令 P^* 要求以 0.1 s 为周期, 产生 $[5, -5, 2, -3]\text{ kW}$ 变化, 以模拟分布式光伏发电系统对储能双向充、放电的工况要求, 对比一般输出反馈与本文增广输出反馈的控制效果如图 5 所示。

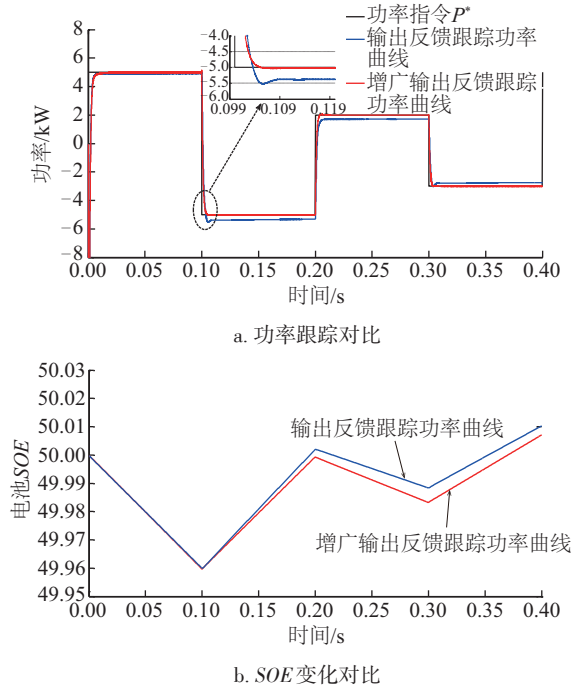


图 5 增广输出反馈与未增广控制的功率指令跟踪及电池 SOE 变化对比图

Fig. 5 Comparison diagram of power tracking curve and SOE in common and augmented output feedback control strategy

从图 5a 可看出在功率给定发生变化时, 本文设计的非线性控制方法在大约 0.004 s 以内无超调、无震荡地跟踪功率, 显示出非线性控制应用于多重化双向 DC-DC 拓扑的优点。同时, 增广输出反馈控制消除功率跟踪约 10% 的稳态误差, 严格跟踪电网、光伏以及符合对储能的指定功率, 消除稳态误差对电网或是负荷的影响, 如图 5b 所示。在长期运行中, 降低由稳态误差造成的储能不合理充放, 有效地保障储能的充放电过程, 延长储能使用时间, 提高经济性。

4.3 网侧电压扰动

假设功率跟踪指令仍为 $+5\text{ kW}$, 在 0.1 s 时高压侧电源电压产生周期 0.1 s 、幅度 $\pm 50\text{ V}$ 的方波波动, 并在 0.2 s 变为周期 0.005 s 、均值为 20 V 、方差

为 20 V 的随机扰动, 其控制效果如图 6 所示。

从图 6 可看出高压侧电源 E 发生突变或是高频随机扰动时, 两重化非隔离双向 DC/DC 变换器的输出功率仍可以快速、准确、无静差地跟踪给定功率, 体现控制器不受高压侧扰动影响, 具有较强的抗扰能力。

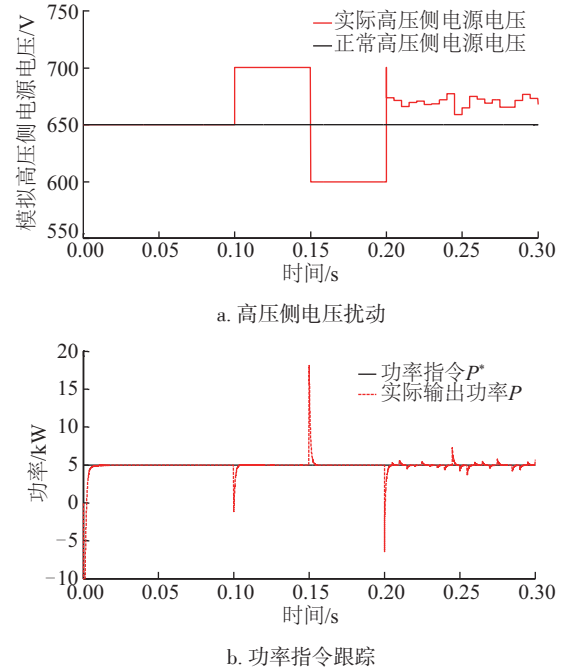


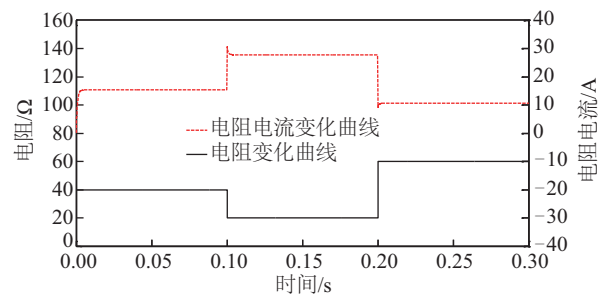
图 6 高压侧电压扰动下, 功率指令跟踪曲线

Fig. 6 Power tracking curve with voltage disturbance in high voltage side

4.4 直流母线负荷变化

假设功率跟踪指令仍为 $+5\text{ kW}$, 在 0.1 s 负载由 $40\ \Omega$ 变为 $20\ \Omega$, 并在 0.2 s 时再变为 $60\ \Omega$, 变化过程如图 7a 所示, 则储能输出功率控制效果如图 7b 所示。

从图 7 可看出在突增或是突卸负载过程中, 虽然系统瞬间功率发生较大的变化, 但在约 5 ms 以内



a. 负载电阻及电流变化

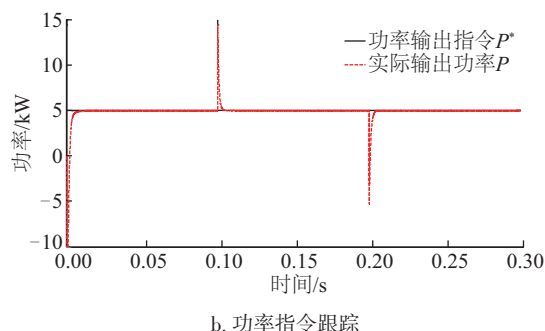


图7 直流母线负荷突变时,功率指令跟踪曲线

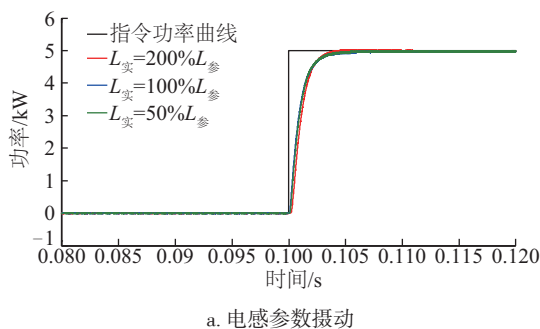
Fig. 7 Power tracking curve with load disturbance in DC bus

的时间内就重新跟踪上给定。说明在本文控制算法下,两重化非隔离双向 DC/DC 变换器的输出功率仍可以快速、准确、无静差地跟踪给定功率,体现出系统对抗负载变化能力较强。

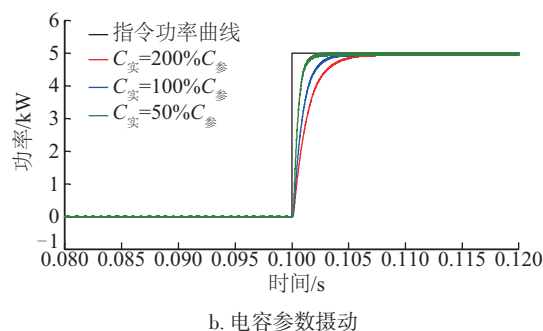
4.5 系统参数摄动

在实际中,电容、电感往往与设定参数值存在偏差,偏差可能是由于元件在长期运行过程中发生变化,系统的分布参数影响或者电子产品生产偏差所造成。控制器对参数偏差的敏感程度可能极大地影响控制效果。假设状态反馈精确线性化控制器设计时符合表 1 参数设计控制器,而实际中电感 L_1 和 L_2 、电容 C 分别为实际值的 50%、100% 及 200%,并在 0.1 s 时,功率给定由 0 kW 变为 +5 kW,实际控制效果如图 8 所示,图 8a、图 8b 中只有一个参数变化。

从图 8 可看出在电路元件实际值与设计控制器的定义的参数值发生有限偏差时,如电感发生变化(保证 CCM 工作模式),控制效果没有任何影响;而在电容发生变化时,其控制的稳态效果无变化,动态响应时间也只是发生毫秒级的影响。输入-输出线性化电流增广控制方法仍可快速、准确地实现跟踪功率指令。仿真控制结果说明,控制器结构与参



a. 电感参数摄动



b. 电容参数摄动

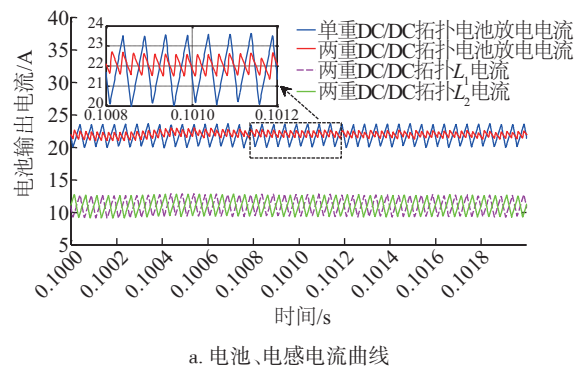
图8 系统参数摄动下,功率指令跟踪曲线

Fig. 8 Power tracking curve with system parameter disturbance

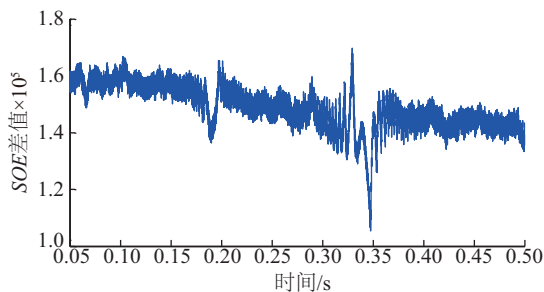
数对系统参数不敏感,对系统不确定性的鲁棒性较强。

4.6 单重与两重化移相控制电感纹波

假设功率跟踪指令仍为 +5 kW,则电感电流指令 $I^*=21.8$ A。在本文控制方法下,比较单重双向 DC/DC 拓扑与两重化拓扑的电池及电感电流,如图 9 所示。单重 DC/DC 拓扑是指没有采用多重化技术,但同样采用非线性电流增广控制方法得到的电池放电电流,等于电感电流。



a. 电池、电感电流曲线



b. 单重与两重结构电池 SOE 误差

图9 单重与两重化移相控制电池、电感电流对比及电池 SOE 误差曲线

Fig. 9 Comparison diagram of inductive current curve and error curve of SOE in single and double-channel interleaving topology with phase shift control strategy

从图 9a 从对比结果可看出在相同输出功率前提下,两重化结构可使电感电流约为原来的一半,换言之可降低电感体积。对比电池放电电流可知,电池放电振动范围由大约 4 V 变为约 1 V,多重化错相控制可减小储能电池的放电电流纹波。电池充电过程可得到类似的结论。图 9b 中忽略启动部分可看出在双向 DC/DC 输出+5 kW 的情况下,两重化结构与单重结构 *SOE* 之差为正,呈下降趋势变化,说明电池电流纹波会对电池运行产生影响。尽管差值很小但考虑电池长时间运行状态,降低储能电池电流纹波将有效保护储能,延长其寿命。

5 结 论

本文提出一种用于分布式光-储发电系统多重化双向 DC/DC 变换器的输入-输出线性化电流增广控制方法,并仿真验证得到以下结论:

1)根据本文对双向 DC-DC 变换器建模与非线性理论分析结果,可以看出输入-输出线性化电流增广控制是利用双向 DC/DC 大信号模型,无须某静态工作点对控制器设计的约束,满足分布式光伏及负荷对储能工作点频繁变迁要求;

2)经输入-输出线性化后,相较一般输出反馈,提出电流增广反馈控制。在满足响应快速性同时,消除跟踪稳态误差,达到无差快速跟踪给定功率指令的目的,消除稳态误差对电网或是负荷的影响或降低由稳态误差造成的不合理充放,延长储能使用时间,提高经济性;

3)输入-输出线性化电流增广控制对高压侧电压扰动、负载突变以及系统参数变化不敏感,体现出较强的抗扰能力和强鲁棒性;

4)多重化双向 DC/DC 变换器结构以及错相调制可以有效地降低电感电流并且降低储能充放电电流纹波,减小不必要的充放电过程,延长储能使用寿命。

[参考文献]

- [1] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1—4.
- [1] Wang Chenshan, Wang Shouxiang. Study on some key problem related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1—4.
- [2] 雷金勇,谢俊,甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 29—36.
- [2] Lei Jinyong, Xie Jun, Gan Deqiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 29—36.
- [3] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11—15.
- [3] Qian Kejun, Yuan Yue, Shi Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11—15.
- [4] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1—12.
- [4] Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1—12.
- [5] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57—70.
- [5] Yang Xinfu, Su Jian, Lyu Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57—70.
- [6] 张建峰,杨祯,鲍陈磊,等. 储能系统在分布式发电中的应用[J]. 船舶工程, 2015, 37(Sup 1): 131—134, 226.
- [6] Zhang Jianfeng, Yang Zhen, Bao Chenlei, et al. Research on energy storage system in distributed power generation[J]. Ship Engineering, 2015, 37(Sup 1): 131—134, 226.
- [7] 马奎安. 超级电容器储能系统中双向 DC/DC 变流器设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] Ma Kuian. The design of bi-directional DC/DC converter applied in super-capacitor storage systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [8] Aharon I, Kuperman A, Shmilovitz D. Analysis of bi-directional buck-boost converter for energy storage applications[A]. Industrial Electronics Society, IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE [C], Vienna, 2013.
- [9] 荣德生,代雨晴,赵君君,等. 基于 R-S-T 控制的复合电源双向 DC/DC 变换器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 132—137.
- [9] Rong Desheng, Dai Yuqing, Zhao Junjun, et al. Design of hybrid power bi-directional DC/DC converters based

- on R-S-T control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 132—137.
- [10] Zhu Lili, Wu Hongfei, Xu Peng, et al. A novel high efficiency high power density three-port converter based on interleaved half-bridge converter for renewable energy applications[A]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE[C], Pittsburgh, PA, 2014.
- [11] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向DC/DC变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39—46.
- [11] Zhu Zhiguo, ZhuWanping, Liu Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 39—46.
- [12] 陈明, 汪光森, 刘德红, 等. 多重化双向DC-DC变换器复合校正双闭环控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 83—88.
- [12] Chen Ming, Wang Guocen, Liu Dejiang, et al. Dual close-loop control strategy for multi-channel interleaving bidirectional DC-DC power converter based on compound regulation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 83—88.
- [13] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向DC-DC变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46—49.
- [13] Zhang Fanghua, Zhu Chenghua, Yan Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46—49.
- [14] 蒋小平, 魏立彬, 彭朝阳, 等. 用于风储系统三重化DC-DC变流器的自适应模糊PI控制[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 15—19.
- [14] Jiang Xiaoping, Wei Libin, Peng Chaoyang, et al. Adaptive fuzzy PI control for triple DC-DC converter of wind and energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 15—19.
- [15] 胡斌, 杨中平, 黄先进, 等. 用于超级电容储能系统的三电平双向直流变换器及其控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 83—89.
- [15] Hu Bin, Yang Zhongping, Huang Xianjin, et al. Three-level bi-directional DC-DC converter and its control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 83—89.
- [16] 武伟, 谢少军, 张翌, 等. 基于MMC双向DC-DC变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 1—8.
- [16] Wu Wei, Xie Shaojun, Zhang Zhao, et al. Analysis and design of control strategy for MMC-BDC based ultra-capacitors energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 1—8.
- [17] 王久和. 基于EL模型的Boost型DC/DC变换器无源控制器[J]. 北京信息科技大学学报, 2012, 27(5): 17—20.
- [17] Wang Jiuhe. Passivity based controller of boost type DC/DC converter based on EL model[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2012, 27(5): 17—20.
- [18] 邓卫华, 张波, 邱东元, 等. 电流连续型Boost变换器状态反馈精确线性化与非线性PID控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 45—50.
- [18] Deng Weihua, Zhang Bo, Qiu Dongyuan, et al. The research of state variable feedback linearization method on the CCM boost converter and nonlinear PID control law[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 45—50.
- [19] Mahmud M A, Pota H R, Hossain M J. Full-order nonlinear observer-based excitation controller design for interconnected power systems via exact linearization approach[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 41: 54—62.
- [20] Mahmud M A, Pota H R, Aldeen M, et al. Partial feedback linearizing excitation controller for multimachine power systems to improve transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 561—571.
- [21] 帅定新, 谢运祥, 王晓刚. Boost变换器状态反馈的精确线性化控制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 134—139.
- [21] Shuai Dingxin, Xie Yunxiang, Wang Xiaogang. Exact linearization control of state feedback for boost converter[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(2): 134—139.
- [22] 罗振鹏, 刘永和, 杨宝峰. 多级注入式电流源型STATCOM模型和非线性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 42(6): 52—57.
- [22] Luo Zhenpeng, Liu Yonghe, Yang Baofeng. Multi-level reinjection current source converter STATCOM modeling and nonlinear control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 42(6): 52—57.
- [23] Liu Yan, Dirk S. Robust control approach for input-output linearizable nonlinear systems using high-gain disturbance observer[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(2): 326—339.

- [24] 帅定新, 谢运祥, 王晓刚, 等. Boost 变换器非线性电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 15—21.
- [24] Shuai Dingxin, Xie Yunxiang, Wang Xiaogang, et al. Nonlinear current control method for Boost converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 15—21.
- [25] 方 炜, 刘晓东, 刘宿城, 等. 基于分段仿射模型的 DC/DC 变换器预测控制研究[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(3): 381—386.
- [25] Fang Wei, Liu Qingdong, Liu Sucheng, et al. Predictive control of DC/DC converter based on PWA model [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(3): 381—386.
- [26] Sira-Ramirez H, Perez-Moreno R A, Ortega R, et al. Passivity based controllers for the stabilization of DC-to-DC power converters [J]. Passivity- Based Control of Power Supplies, 1997, 33(4): 499—513.
- [27] Krener A J. On the equivalence of control systems and the linearization of nonlinear systems [J]. Siam Journal on Control, 1973, 11(4): 670—676.
- [28] 程代展. 非线性系统的微分几何理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 138—182.
- [28] Cheng Daizhan. Differential geometry theory of nonlinear systems [M]. Beijing: Science Press, 1982, 138—182.
- [29] 王久和. 先进非线性控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 54—89.
- [29] Wang Jiuhe. Advanced nonlinear control theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2012, 54—89.

AUGMENTED CURRENT CONTROL STRATEGY FOR MULTI-CHANNEL INTERLEAVING BIDIRECTIONAL DC/DC POWER CONVERTER

Ma Suliang, Wu Jianwen, Huang Lian, Chen Mingxuan

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the multiple bi-directional DC/DC converter topological structure of distributed PV-energy storage generation system, a control strategy is proposed based on input-output linearization of augmented current. The affine nonlinear mathematical model of bi-directional DC/DC converter and internal dynamic equation is established and analyzed, respectively. Inductor current is determined as the output of the state space description. And then, the input-output is linearized by nonlinear transformation based on augmented current feedback principle. The second-order classic control system equation of input-output is established to design the controller. It has been verified by digital simulation that the proposed control method can accurately, rapidly and robustly track power reference, eliminate the steady-state error for grid or load. And multiple structure and phase stagger modulation can reduce the inductor current and current ripple of each phase effectively.

Keywords: distributed generation system; energy storage system; bi-directional DC/DC converter; multiple topology; nonlinear control; expansion output feedback